新疆甘家湖梭梭林国家级自然保护区植被群落多样性及空间分布格局

王安琪[1]， 张 钰[1]， 刘佳伟[1]， 赵 威[2]， 刘馨雨[2]， 李 凯[1]

（1. 北京林业大学生态与自然保护学院，北京 100083；2. 新疆甘家湖梭梭林国家级自然保护区管理局精河分局，新疆 精河 833300）

摘 要：新疆甘家湖梭梭林国家级自然保护区位于典型的绿洲-荒漠过渡带，明确保护区内主要植被类型及分布有助于生物多样性的保护与恢复。以2022年同期遥感影像为样点布设依据，在2023年8月进行实地调查，利用双向指示种分析法（TWINSPAN）对保护区内植被样方进行分类，计算各植被类型的α多样性指数，随后构建随机森林模型以评估植被样方的聚类结果并可视化。结果表明：（1）在甘家湖保护区，草本植物以猪毛菜属（*Salsola* spp.）分布最为广泛，灌木以梭梭（*Haloxylon ammodendron*）、碱蓬属（*Suaeda* spp.）、红砂（*Reaumuria songarica*）、角果藜（*Ceratocarpus arenarius*）等为这一地区主要的植被组成。（2）TWINSPAN将62个植被样方划分成14个类型，其中猪毛菜属+碱蓬属群丛（Ass. *Salsola* spp.+*Suaeda* spp.，G5）所占面积最大，且植被多样性最高；猪毛菜属+角果藜群丛（Ass. *Salsola* spp.+*Ceratocarpus arenarius*，G7）物种多样性较高，同时面积占比较大；单一植被型群丛（G14）Shannon-Wiener多样性指数与Simpson优势度指数均为最低，Pielou均匀度指数为1，在保护区中主要体现为农田和盐渍化极高的裸地。（3）随机森林模型的总体精度达到87.10%，Kappa系数达到0.8553，错分误差与漏分误差相对较小。（4）梭梭和白梭梭集中分布在保护区西北部核心区以及中偏南部的缓冲区。研究结果可为保护区后续精准管理奠定基础。

关 键 词：植被类型；空间分布；双向指示种分析法；物种多样性；随机森林

文章编号：1000－6060(2024)11－1841－11(1841～1851)

植被是在特定自然条件下形成和发育的某一区域内所有种类的植物总体，作为生产者，是生物圈中最基础的生物组成部分[1]。全面认识植被类型及其分布特征，有助于对植被及相关资源的合理利用。干旱荒漠生态环境较为脆弱，是最易受气候变化及人类活动影响的地区之一，其中植被多样性在干旱区生态系统功能变化中能够发挥正向促进作用[2]。新疆甘家湖梭梭林国家级自然保护区（简称甘家湖保护区）于1983年成立，2001年晋升为国家级自然保护区[3]，是梭梭（*Haloxylon ammodendron*）和白梭梭（*H. persicum*）的重要交汇分布地[4]。梭梭和白梭梭是干旱荒漠区的主要建群种，具有耐旱、耐盐碱等优良特性[5]，发挥着保持水土、防风固沙、固碳释氧等关键的生态作用[6]。甘家湖保护区有着较为完整的荒漠生态系统[7]，且由于其独特的地理位置和重要的生态功能，定期详细地掌握保护区植被生物多样性现状是十分必要的。

双向指示种分析法（TWINSPAN）由Hill[8]在1979年提出，成为20世纪80年代至今在植被群落分类中应用频率最高的方法之一，已被广泛应用于森林[9-10]、草原[11-12]、荒漠[13]、干旱河谷[14]、湿地[15]等植被研究中。近年来，随着科学技术的飞速发展，

收稿日期：2024-03-01； **修订日期：**2024-06-22
基金项目：新疆自然保护地调查与国家公园潜力区科学考察（2021xjkk1201）资助
作者简介：王安琪（1999-），女，硕士研究生，主要从事野生动植物保护与利用研究. E-mail: hanguang2021@126.com
通讯作者：李凯（1963-），男，博士，教授，主要从事野生动植物保护与利用研究. E-mail: jiujiu@bjfu.edu.cn

大数据算法愈发成熟,更加高效简便的植被分类方法层出不穷,如结合高光谱遥感和机器学习算法进行植物分类[16-17]。随机森林是一种利用多个树分类器进行分类的集成算法,通过重抽样方法从原始样本中抽取多个样本,并对每个样本构造决策树,最后综合多个决策树的结果,具有准确率高、可以防止过拟合等优势[18],在Zhou等[19]和Han等[20]相关植被研究中的拟合精度高于其他机器学习算法,成为生态学领域重要的研究工具。

传统的植被调查研究一般通过样带法[21]和样方法[22]对保护区植被进行全面踏查、均匀布设样点,尽管这种方法准确性较高,但最后调查结果难以通过图像直观表达。因此,本研究依据2022年8月遥感图像初步划分的植被斑块选取调查样点,利用机器学习算法将实地调查数据与遥感分类数据相结合,对甘家湖保护区植被群落分布特征和多样性进行分析,并将植被群落空间分布格局以图像形式直观呈现,为保护区后续科学建设与发展提供重要依据。

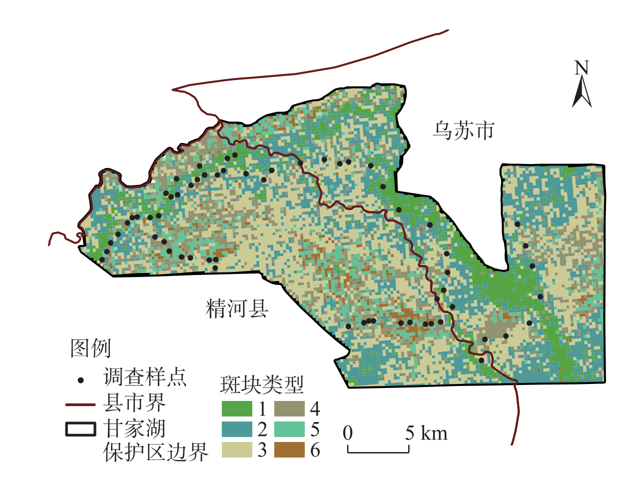
1 材料与方法

1.1 研究区概况

甘家湖保护区(83°18′~83°52′E,44°46′~44°58′N)地处欧亚大陆桥的腹地,位于新疆准噶尔盆地西南部,西接艾比湖北缘,属艾比湖盆地,在行政区划中地跨博尔塔拉蒙古自治州的精河县和塔城地区乌苏市(图1)。保护区所在地区气候类型为温带大陆性气候,全年干燥少雨,年均气温为5.9~7.8 ℃;年均降水量约为140 mm,年蒸发量巨大,约为年降水量的14倍[23]。地带性土壤为灰棕色荒漠土和灰漠土,沙漠面积广布,盐渍土、草甸土等隐域性土壤分布也较广。保护区有融雪雨水补给型的季节性河流流经,形成了湿地、荒漠、盐碱地等多种景观类型,孕育了以胡杨为主的高大乔木,梭梭、柽柳(*Tamarix* spp.)等灌木以及草本植物芦苇(*Phragmites australis*)等多种植被[24]。

1.2 调查方法

采用2022年8月10 m精度Sentinel-2卫星定位数据为数据源,依据自然地理要素对保护区内植被斑块进行非监督分类(图1)。每种斑块类型选



注:对甘家湖保护区2022年夏季遥感数据进行非监督分类划分得到6种斑块类型,以此为依据进行调查样点的随机抽样选择。

图1 研究区位置及调查样点分布

Fig. 1 Location of the study area and distribution of survey sample sites

择8~10个样点进行实地调查,记录样方内植被种类、数量、高度、盖度、冠幅、地径等参数。保护区属于荒漠草地类生境,多为灌木及草本植被,依据《中国植被志》研编规范[22],大样方尺寸统一设置为10 m×10 m,命名为q1~q62,记录全部灌木植物信息,结合五点取样法在大样方内划定5个2 m×2 m小样方,记录草本植物信息。由于该地区只有胡杨一种高大乔木,所以在有胡杨分布的地区则在10 m×10 m的基础上拓宽至20 m×20 m的范围内记录数量。本研究共计调查13个20 m×20 m乔木样方、62个10 m×10 m灌木样方、310个2 m×2 m草本样方。

1.3 数据处理

1.3.1 TWINSPAN分类 通过计算样方内各植被的相对密度、相对盖度、相对频度,综合计算各物种在各样方内的重要值,得到各样地的物种重要值原始矩阵。重要值(IV)是反映某种植物在相应群落中的作用和地位的综合数值指标[25],设置IV≥20为优势种、10≤IV<20为伴生种、IV<10为偶见种[26]。基于重要值原始矩阵,利用TWINSPAN对研究区域内的植被样方进行分类。以上计算过程均在R Studio中完成。

相对密度、相对盖度、相对频度计算公式如下:

$$\mathrm{RD}_i = \left(\frac{D_i}{\sum_{i=1}^{n} D_i} \right) \times 100\% \tag{1}$$

$$\mathrm{RC}_i = \left(\frac{C_i}{\sum_{i=1}^{n} C_i} \right) \times 100\% \quad (2)$$

$$\mathrm{RF}_i = \left(\frac{F_i}{\sum_{i=1}^{n} F_i} \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中：RD_i、RC_i、RF_i分别为物种i在各样方中的相对密度(%)、相对盖度(%)和相对频度(%)；D_i、C_i、F_i分别为物种i在各样方中的平均密度[株·(100m^2)$^{-1}$)]、平均盖度(%)和平均频度(次)。

重要值计算公式如下：

$$\mathrm{IV} = \left(\mathrm{RD}_i + \mathrm{RC}_i + \mathrm{RF}_i\right)/3 \quad (4)$$

1.3.2 物种α多样性分析 Shannon-Wiener多样性指数被认为是测量群落物种多样性中最常见的指标，用于解释样本群落的物种丰富度。Simpson优势度指数用于反映群落内物种数量的变化。Pielou均匀度指数用来描述群落中物种分布的均匀性。根据TWINSPAN植被群落分类结果，计算各群落中植被Shannon-Wiener多样性指数(H')、Simpson优势度指数(D)和Pielou均匀度指数(J)，计算公式如下：

$$H' = -\sum\left(P_i \times \ln P_i\right) \quad (5)$$

$$D = 1 - \sum P_i^2 \quad (6)$$

$$J = -H'/\ln S \quad (7)$$

式中：P_i为第i个物种的个体数占所有物种个体数的比例(%)；S为物种数(种)。

1.3.3 随机森林模型构建及精度评价 为全域划分甘家湖保护区植被类型并将植被分类结果可视化，本研究在遥感分类的基础上，综合TWINSPAN分类结果，对62个样方分层抽样，抽取75%的样方作为训练集进行随机森林模型构建，剩余25%的样方作为测试集进行模型精度验证。将验证结果与分类结果对比分析，得出混淆矩阵，并计算Kappa系数来评价此分类方法在植被分类中的精度。Kappa系数越接近1，代表模型拟合程度越高。

1.3.4 梭梭属植物分布格局划定 在划分出的植被类型中，依据梭梭与白梭梭在其中重要值的高低划分出梭梭属植物的高(IV≥20)、中(20>IV>0)、无(IV=0)3级分布区域，作为定性数据以颜色深浅显示。利用ArcGIS工具中的克里金插值[27]法采用实地调查数据中梭梭属植物在单位面积内的数量计算梭梭属植物的密度作为定量数据，将2张图层色块相叠加，整体表示全域梭梭属植被空间布局。

2 结果与分析

2.1 保护区植被概况与TWINSPAN分类结果

经调查，甘家湖保护区主要植被信息如表1所示。在植被鉴定中，除猪毛菜属(*Salsola* spp.)、碱蓬属(*Suaeda* spp.)、蒿属(*Artemisia* spp.)和沙拐枣属(*Calligonum* spp.)植物定位至属以外，其余均鉴定至种。在甘家湖保护区内，草本植物以猪毛菜分布范围最为广泛，大约在90%的样方均有所出现，在8个群丛中处于优势种地位，平均重要值最高；灌木以梭梭、碱蓬属、红砂(*Reaumuria songarica*)、多枝柽柳(*Tamarix ramosissima*)等平均重要值较高，盖度较高，是这一地区主要的植被组成。

依据《中国植被》的分类原则，以重要值为依据，对甘家湖保护区62个大样方进行TWINSPAN分类，并根据群落的优势种进行命名，结果划分为14个群丛(图2)。各植被群丛组成如下：

蒿属群丛(Ass. *Artemisia* spp.，G1)，包含4个大样方，群落总盖度为49%。其中，蒿属植物重要值为54.51，盖度为23.7%。主要伴生植物类群为猪毛菜属植物。该群丛中偶见种有沙拐枣属植物、骆驼刺(*Alhagi camelorum*)、白梭梭、沙蓬(*Agriophyllum pungens*)、白麻(*Apocynum pictum*)和蓝刺头(*Echinops sphaerocephalus*)等。

碱蓬属+角果藜群丛(Ass. *Suaeda* spp.+*Ceratocarpus arenarius*，G2)，包含4个大样方，群落总盖度为48.25%。其中，碱蓬属植物重要值为27.30，盖度为6.65%；角果藜重要值为21.48，盖度为4.95%。主要伴生植物类群有猪毛菜属植物和戈壁藜(*Iljinia regelii*)。同时，较少分布有骆驼刺和胡杨(*Populus euphratica*)、驼绒藜(*Krascheninnikovia ceratoides*)、白梭梭和荠(*Capsella bursa-pastoris*)。

白梭梭+猪毛菜属群丛(Ass. *Haloxylon persicum*+*Salsola* spp.，G3)，包含2个大样方，群落总盖度为65%。其中，白梭梭重要值为21.96，盖度为17.5%；猪毛菜属植物重要值为39.99，盖度为9.5%。主要伴生植物为胡杨。偶见种有骆驼刺、红砂、多枝柽柳和沙拐枣属植物。

猪毛菜属+白梭梭群丛(Ass. *Salsola* spp.+*Haloxylon persicum*，G4)，包含5个大样方，群落总盖度为42.4%。其中，猪毛菜属植物重要值为40.49，盖度

表1 甘家湖保护区主要植被概况

Tab. 1 Overview of the main vegetation in Ganjiahu Nature Reserve

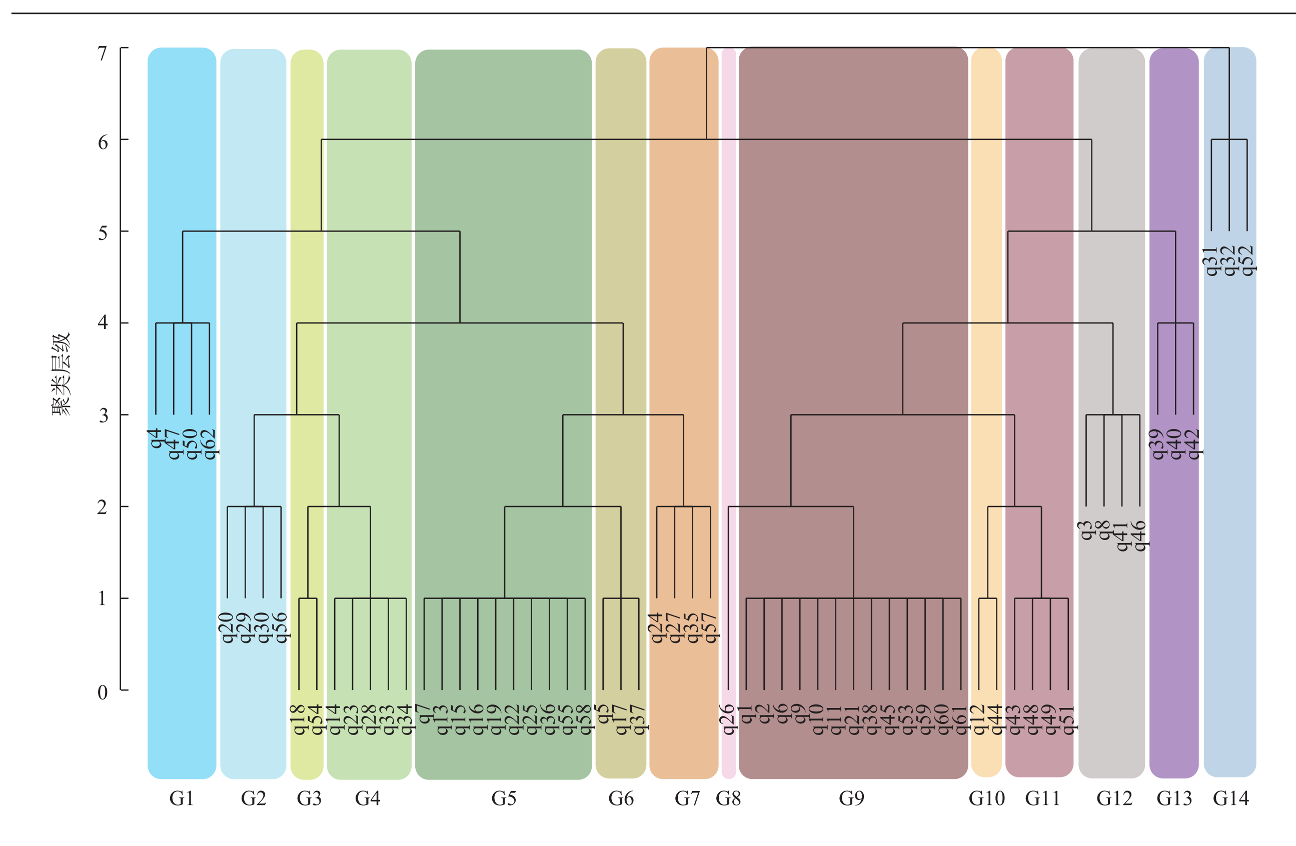
序号	植物种类	拉丁学名	平均高度/cm	平均盖度/%	平均重要值
1	猪毛菜属	*Salsola* spp.	12.49	9.80	31.02
2	梭梭	*Haloxylon ammodendron*	195.74	42.39	9.70
3	碱蓬属	*Suaeda* spp.	30.24	17.26	8.27
4	芦苇	*Phragmites australis*	45.59	8.29	6.68
5	红砂	*Reaumuria songarica*	49.53	19.66	4.88
6	角果藜	*Ceratocarpus arenarius*	6.66	7.80	4.67
7	多枝柽柳	*Tamarix ramosissima*	166.40	54.40	4.44
8	蒿属	*Artemisia* spp.	42.52	23.87	4.40
9	盐节木	*Halocnemum strobilaceum*	19.85	27.46	4.33
10	戈壁藜	*Iljinia regelii*	31.83	6.78	3.30
11	黑果枸杞	*Lycium ruthenicum*	23.13	19.88	3.23
12	白梭梭	*Haloxylon persicum*	131.08	25.96	2.99
13	骆驼刺	*Alhagi camelorum*	41.89	14.33	2.45
14	花花柴	*Karelinia caspia*	39.00	5.55	1.26
15	小果白刺	*Nitraria sibirica*	30.38	26.50	1.11
16	胡杨	*Populus euphratica*	235.00	45.00	0.93
17	驼绒藜	*Krascheninnikovia ceratoides*	53.11	13.89	0.75
18	铃铛刺	*Caragana halodendron*	133.00	33.40	0.73
19	沙拐枣属	*Calligonum* spp.	37.60	17.40	0.72
20	盐爪爪	*Kalidium foliatum*	29.60	9.00	0.66
21	盐穗木	*Halostachys caspica*	78.75	47.00	0.45
22	雾冰藜	*Grubovia dasyphylla*	3.00	1.67	0.44
23	抱茎独行菜	*Lepidium perfoliatum*	41.00	9.17	0.39
24	大叶补血草	*Limonium gmelinii*	51.83	9.67	0.38
25	芨芨草	*Neotrinia splendens*	78.75	18.25	0.36
26	甘草	*Glycyrrhiza uralensis*	25.00	20.00	0.28
27	白麻	*Apocynum pictum*	90.00	17.00	0.26
28	东方旱麦草	*Eremopyrum orientale*	8.00	10.00	0.24
29	沙蓬	*Agriophyllum pungens*	29.50	3.00	0.20
30	蓝刺头	*Echinops sphaerocephalus*	16.00	1.50	0.18
31	肉苁蓉	*Cistanche deserticola*	18.00	1.00	0.13
32	盐生假木贼	*Anabasis salsa*	13.50	4.00	0.13
33	荠	*Capsella bursa-pastoris*	6.00	1.00	0.04

为10.72%；白梭梭重要值为21.67，盖度为14.84%。主要伴生植物类群有角果藜和碱蓬属植物。该群丛中偶见种有戈壁藜、铃铛刺(*Caragana halodendron*)、大叶补血草(*Limonium gmelinii*)、梭梭和盐生假木贼(*Anabasis salsa*)。

猪毛菜属+碱蓬属群丛(Ass. *Salsola* spp.+*Suaeda* spp., G5)，包含10个大样方，群落总盖度为62.5%。其中，猪毛菜属植物重要值为28.51，盖度为7.4%；碱蓬属植物重要值为19.64，盖度为13.48%。主要伴生植物有多枝柽柳和戈壁藜。该群丛中偶见种有黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)、抱茎独行菜(*Lepidium perfoliatum*)、芨芨草(*Neotrinia splendens*)、胡杨、蒿属植物、大叶补血草、花花柴(*Karelinia caspia*)和红砂等。

猪毛菜属群丛(Ass. *Salsola* spp., G6)，包含3个大样方，群落总盖度为45%。其中，猪毛菜属植物重要值为53.66，盖度为6.4%。主要伴生植物类群有碱蓬属植物、铃铛刺和梭梭。同时，偶见种为驼绒藜。

猪毛菜属+角果藜群丛(Ass. *Salsola* spp.+*Cera-*



注：q1~q62为62个大样方编号；G1~G14为14个群丛。

图2　TWINSPAN样方分类树

Fig. 2　TWINSPAN plot classification tree

tocarpus arenarius，G7），包含4个大样方，群落总盖度为47.5%。其中，猪毛菜属植物重要值为33.68，盖度为9.15%；角果藜重要值为20.25，盖度为6.55%。主要伴生植物类群有碱蓬属植物和多枝柽柳。该群丛中偶见种有梭梭、东方旱麦草（*Eremopyrum orientale*）、沙拐枣属植物、盐生假木贼、大叶补血草和蒿属植物等。

梭梭+花花柴群丛（Ass. *Haloxylon ammodendron*+*Karelinia caspia*，G8），包含1个大样方，群落总盖度为80%。梭梭重要值为57.57，盖度为51.2%；花花柴重要值为37.90，盖度为5.2%。主要伴生植物类群为碱蓬属植物。

猪毛菜属+梭梭群丛（Ass. *Salsola* spp.+*Haloxylon ammodendron*，G9），包含13个大样方，群落总盖度为40.23%。猪毛菜属植物重要值为47.71，盖度为8.75%；梭梭重要值为24.99，盖度为17.52%。主要伴生植物为红砂。同时，偶见种有芦苇、小果白刺（*Nitraria sibirica*）、沙拐枣属植物和肉苁蓉（*Cistanche deserticola*）等。

红砂+猪毛菜属群丛（Ass. *Reaumuria songarica*+*Salsola* spp.，G10），包含2个大样方，群落总盖度为19%。红砂重要值为32.36，盖度为6%；猪毛菜属重要值为26.92，盖度为0.5%。主要伴生植物类群有黑果枸杞和蒿属植物。同时，偶见种有盐爪爪（*Kalidium foliatum*）和梭梭。

盐节木+猪毛菜属群丛（Ass. *Halocnemum strobilaceum*+*Salsola* spp.，G11），包含4个大样方，群落总盖度为30%。盐节木重要值为39.91，盖度为16.1%；猪毛菜属重要值为31.76，盖度为3.95%。主要伴生植物为红砂。该群丛中偶见种有芦苇、黑果枸杞、雾冰藜（*Grubovia dasyphylla*）、驼绒藜、花花柴和肉苁蓉（*Cistanche deserticola*）等。

芦苇群丛（Ass. *Phragmites australi*，G12），包含4个大样方，群落总盖度为43.75%。芦苇重要值为42.82，盖度为7.65%。主要伴生植物类群为猪毛菜属植物。该群丛中偶见种有花花柴、盐穗木（*Halostachys caspica*）、盐爪爪、雾冰藜、甘草（*Glycyrrhiza uralensis*）、小果白刺、大叶补血草和白麻等。

黑果枸杞+芦苇群丛（Ass. *Lycium ruthenicum*+*Phragmites australis*，G13），包含3个大样方，群落总

盖度为21%。黑果枸杞重要值为40.54,盖度为12.67%;芦苇重要值为36.44,盖度为4.27%。主要伴生植物有多枝柽柳和梭梭。

单一植被型群丛(G14),包含3个大样方,群落总盖度为1.67%。该群丛野生植物盖度很低,实地调查显示,主要分为2种情况:(1)保护区内盖度很低的地区,主要为生态脆弱的盐碱地,大片裸露,盐渍浮于地表,偶有盐节木(*Halocnemum strobilaceum*);(2)保护区外围实验区内的农田,包含q31和q32 2个大样方。

2.2 植被群落多样性分析

物种多样性能有效表征生物群落和生态系统结构的复杂性,以不同优势种为代表的不同类型的植被群落是在地貌、基质、水分、盐分等多种因素的综合作用下形成的。对分类后的样方进行多样性分析,其中α多样性指数用Shannon-Wiener多样性指数、Simpson优势度指数和Pielou均匀度指数表示。在甘家湖保护区,各植被群落物种的α多样性指数如表2所示。

Shannon-Wiener多样性指数:

G5>G12>G7>G4>G2>G11>G3>G6>G10>G1>G9>G13>G8>G14;

Simpson优势度指数:

G5>G7>G12>G4>G11>G2>G6>G10>G13>G8>G9>G3>G1>G14;

表2 不同植被群丛α多样性指数

Tab. 2 α diversity indices of different vegetation clusters

群丛编号	样方数量	Shannon-Wiener多样性指数	Simpson优势度	Pielou均匀度指数
G1	4	1.354	0.594	0.565
G2	4	1.643	0.745	0.685
G3	2	1.475	0.652	0.640
G4	5	1.661	0.774	0.668
G5	10	1.864	0.798	0.645
G6	3	1.437	0.727	0.739
G7	4	1.748	0.792	0.703
G8	1	1.304	0.700	0.810
G9	13	1.339	0.664	0.558
G10	2	1.409	0.716	0.677
G11	4	1.593	0.760	0.641
G12	4	1.782	0.775	0.658
G13	3	1.305	0.706	0.729
G14	3	0.693	0.500	1.000

Pielou均匀度指数:

G14>G8>G6>G13>G7>G2>G10>G4>G12>G5>G11>G3>G1>G9。

G5的Shannon-Wiener多样性指数与Simpson优势度指数最高,说明这种植被群丛包含的物种丰富,物种数高达16种;但Pielou均匀度指数相对较低,植被个体之间差异性较大。Shannon-Wiener多样性指数较高的还有G12、G7、G4等植被群丛。尽管G3和G4优势种植物相同,均为猪毛菜属植物和白梭梭,但2个群丛的伴生种和偶见种植物大相径庭,有10种植物仅在一个群丛有所分布,总物种数G4比G3多2种;G4的Shannon-Wiener多样性指数、Simpson优势度指数和Pielou均匀度指数均高于G3。G14的Shannon-Wiener多样性指数与Simpson优势度指数均为最低,Pielou均匀度指数为1.000,为单一植被型群丛。

2.3 基于随机森林的植被类型划分

利用植被分类数据进行随机森林模型构建,获得甘家湖保护区植被类型分布图(图3),采用混淆矩阵对分类结果精度进行评价(表3)。分类总体精度达到87.10%,Kappa系数达到0.8553,表示基于随机森林的分类精度总体较好。各植被类型生产者精度和使用者精度均高于60%,且大部分集中在70%~100%之间,错分误差与漏分误差均相对较小。

通过计算每个植被群落分类面积发现,G5面积达到124.87 km^2,占整体甘家湖面积的20.33%;G2面积达到116.15 km^2,占比18.91%;G7面积达到83.71 km^2,占比13.63%;G9面积达到81.26 km^2,占比13.23%。其余植被群落分布面积较小(表3)。

2.4 梭梭属植被分布区划定

对甘家湖保护区而言,梭梭和白梭梭为当地建群种,是国家Ⅱ级重点保护植物,具有重要的生态意义。因此,本研究重点针对这2种梭梭属植物,通过实地调查结合模型构建,结合定性与定量方法得到2种梭梭属植物的空间分布(图4)。研究发现,梭梭属主要集中分布在保护区西北部核心区以及中偏南部的缓冲区,较少分布在保护区东南部与东北部实验区,形成了条带状的地理分布格局。

3 讨 论

甘家湖保护区是绿洲边缘阻挡风沙侵袭的绿

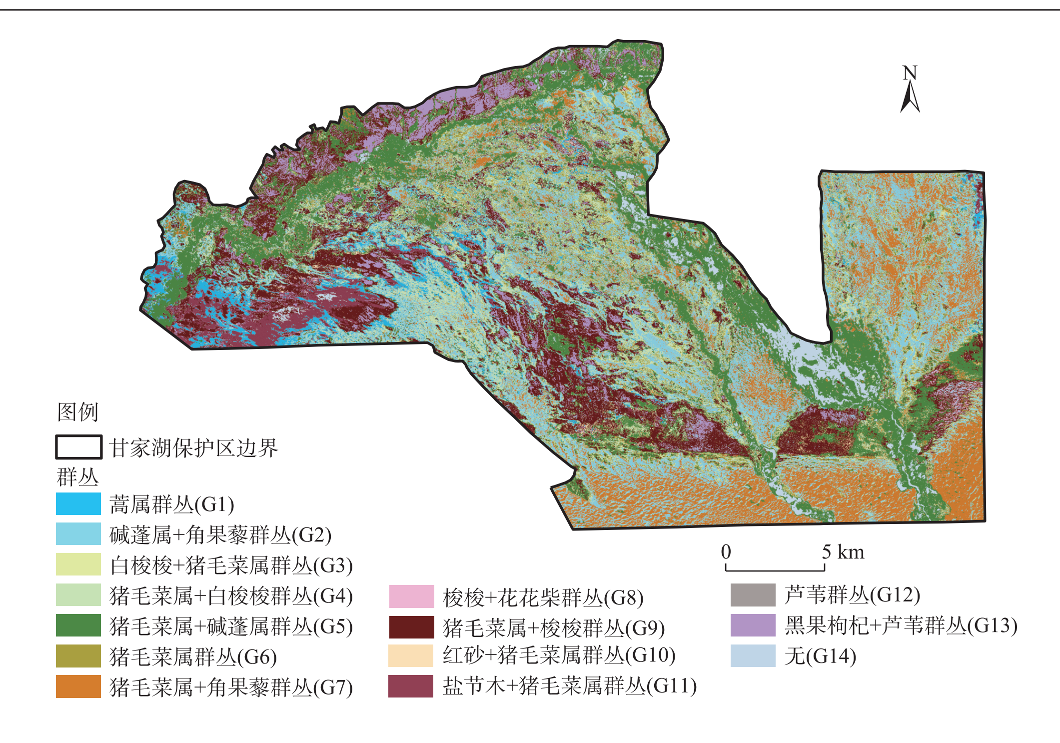


图3　基于随机森林模型的甘家湖保护区植被类型分布

Fig. 3　Distribution of vegetation types in Ganjiahu Nature Reserve based on random forest model

表3　基于随机森林模型划分的各植被类型面积及精度验证

Tab. 3　Verification of the area and accuracy of each vegetation type based on random forest model

群丛编号	面积/km²	面积占比/%	生产者精度/%	使用者精度/%
G1	28.50	4.64	75.00	100.00
G2	116.15	18.91	100.00	80.00
G3	18.45	3.00	100.00	100.00
G4	59.31	9.66	60.00	75.00
G5	124.87	20.33	90.00	69.23
G6	26.07	4.25	100.00	100.00
G7	83.71	13.63	100.00	100.00
G8	2.84	0.46	100.00	100.00
G9	81.26	13.23	84.62	91.67
G10	6.63	1.08	100.00	66.67
G11	17.05	2.78	100.00	100.00
G12	1.72	0.28	75.00	100.00
G13	32.28	5.26	100.00	100.00
G14	15.39	2.51	66.67	100.00

洲-荒漠过渡带[28]，因此对保护区植被多样性分析及植被群落空间分布格局的研究势在必行。在甘家湖保护区，依据TWINPSAN将实际调查样方划分为14个植被群落类型，其中G12芦苇群丛多样性较高，可能是由于大部分位于地下水补给较好的河岸边缘等区域。Shannon-Wiener多样性指数排名前3

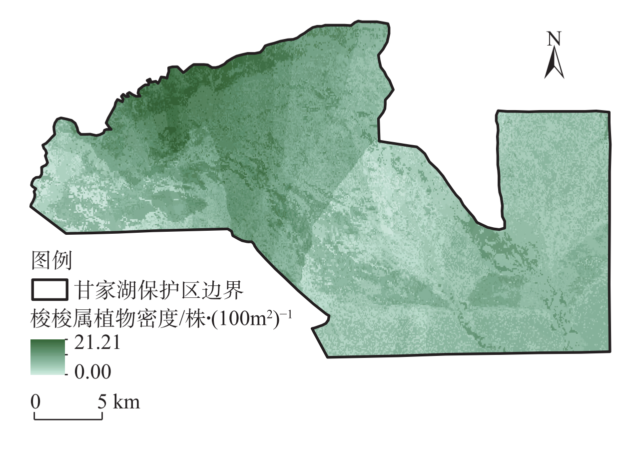


图4　甘家湖保护区梭梭属植物空间分布格局

Fig. 4　Spatial distribution pattern of *Haloxylon* plants in Ganjiahu Nature Reserve

的群丛G5、G12、G7面积之和超过了保护区总面积的1/3，植被多样性较高的区域主要分布在保护区西北缘、南缘及东部，呈贯穿状，这一结果的产生与地形和水源条件密不可分。G14的Shannon-Wiener多样性指数最低、Pielou均匀度指数为1.000，为单一植被型群丛，在保护区中主要体现为农田和盐渍化极高的盐碱地；其中盐碱地生境极其脆弱，地表为较厚的盐化结皮土，仅有极少数植被生长，植被盖度约7%。尽管G3和G4优势种植物相同，但其伴生种和偶见种植物大相径庭：G3主要伴生植物为胡

杨，偶见种有骆驼刺、红砂、多枝柽柳、沙拐枣属植物；G4主要伴生植物类群有角果藜和碱蓬属植物，偶见种有戈壁藜、铃铛刺、大叶补血草、盐生假木贼。出现这种情况可能是由于这2种植被群落土壤盐分和地下水存在差异，最终表现为G4的Shannon-Wiener多样性指数、Simpson优势度指数和Pielou均匀度指数均高于G3。本研究缺少对于土壤类型与植被群落划分的关联性分析，这一不足之处将在未来的研究工作中加以改进。刘丽燕等[23]将甘家湖保护区的植被划分成7个植被型组、7个植被型、14个植被亚型和40个主要的植物群系，但仅限于描述性文字而未有分布情况展示。本研究全面展现了荒漠生态系统夏季景观中的植被群落结构，通过实地调查数据完成植被群落划分，具有更强的科学性和可信度，并在机器学习算法的辅助下细化植被分类，并且将植被类型分布以图像形式直观呈现，有助于保护区管理人员顺利开展工作。

梭梭属植物作为准噶尔盆地的建群种和先锋物种对维持当地群落稳定及生态系统平衡起到不可替代的作用[29]，如：固结沙粒，促进土壤形成[30]；减弱土壤水分蒸发[31]，为沙漠动物提供隐蔽栖身空间[32]；改变了地表对太阳辐射的直接吸收与散失过程，调节局地微气候[33]；使沙漠地区深层土壤水分达到动态平衡[34]。近年来，多项研究表明：受气候变化和人类活动影响，保护区植被退化严重[3]，1972—2008年保护区沙地与盐碱地面积快速增加，而草地面积大量减少[24]，现实情况不容乐观。明确保护区内梭梭的分布是许多研究工作的基础和前提，有利于管理人员针对性地定期开展监测与保护工作。曹家睿[35]对甘家湖白梭梭空间格局的研究认为，研究区西北部白梭梭的分布较为密集，有逐渐向边缘地区扩散的趋势；东南部白梭梭群落的分布密度较小。本研究显示，梭梭和白梭梭主要分布在保护区西北部核心区以及中偏南部的缓冲区，且密度较高；东南部与东北部为保护区实验区，梭梭属分布较少，形成了条带状分布的地理格局。这与前人研究结果一致，并增加了梭梭分布范围的划定，更进一步细化了研究区中梭梭属植物的分布格局。

在过去的20多年，随机森林分类器的使用由于获得了出色的分类结果和高效的处理速度而受到青睐[18]。随机森林模型使用随机选择的训练样本和变量子集产生多个决策树，能够对卫星遥感数据、无人机监测数据、实地调查数据等进行学习，在生态学中不仅适用于植被分类，还可以用于植被识别[17]、动态监测[36]以及土地利用变化[37]等多项议题。在沙丘和沼泽这2种典型干旱区景观中，随机森林分类器对灌木的识别表现出高准确率(>95%)[38]。Barrett等[39]评估了基于中空间分辨率光学和雷达卫星数据并辅助土壤和地形数据，使用随机森林算法识别和绘制高地植被图，分类结果在不同的研究区域普遍适用。本研究利用遥感将甘家湖保护区划分为6个植被类型，在此基础上随机抽样获取实地调查数据用以植被分类，得到14个植被群落类型，并建立随机森林模型矫正遥感分类结果。模型总体精度达到87.10%，Kappa系数0.8553，证实了将遥感图像与实地调查数据结合完成植被分类的可行性。

4 结 论

(1) 在甘家湖保护区，草本植物以猪毛菜属分布范围最为广泛，大约在90%的样方均有所出现，在8个群丛中处于优势种地位；灌木以梭梭、碱蓬属、红砂、多枝柽柳等平均重要值较高，是这一地区主要的植被组成。

(2) TWINSPAN将62个样方划分成14个植被类型，其中猪毛菜属+碱蓬属群丛(G5)所占面积最大，且植被多样性最高；猪毛菜属+角果藜群丛(G7)多样性较高的同时面积占比较大；单一植被型群丛(G14)的Shannon-Wiener多样性指数与Simpson优势度指数均为最低，Pielou均匀度指数为1.000，在保护区中主要体现为农田和盐渍化极高的裸地。

(3) 以遥感分类为基础，利用甘家湖植被TWINSPAN分类数据进行随机森林模型构建，分类总体精度达到87.10%，Kappa系数达到0.8553，各植被类型生产者精度和使用者精度大部分集中在70%~100%之间，证实了将遥感图像与实地调查数据结合完成植被分类的可行性。

(4) 针对2种梭梭属植物的空间格局显示，梭梭和白梭梭主要分布在保护区西北部核心区以及中偏南部的缓冲区，较少分布在保护区东南部与东北部实验区，形成了条带状的地理分布格局。

致谢：感谢新疆甘家湖梭梭林国家级自然保护

区管理局精河分局、乌苏分局对于本研究的大力支持，感谢保护区五道泉管护站工作人员的付出与帮助。

参考文献(References)

[1] 方精云, 郭柯, 王国宏, 等.《中国植被志》的植被分类系统、植被类型划分及编排体系[J]. 植物生态学报, 2020, 44(2): 96–110. [Fang Jingyun, Guo Ke, Wang Guohong, et al. Vegetation classification system and classification of vegetation types used for the compilation of "Vegetation of China"[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, 44(2): 96–110.]

[2] Li C J, Fu B J, Wang S, et al. Drivers and impacts of changes in China's drylands[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2021, 2(12): 858–873.

[3] 刘炳强. 甘家湖荒漠林区环境恶化原因及治理对策[J]. 防护林科技, 2014(10): 85, 126. [Liu Bingqiang. Causes of environmental degradation and control strategies in the Ganjiahu desert forest area[J]. Protection Forest Science and Technology, 2014(10): 85, 126.]

[4] 陈雨婷, 马松梅, 张丹, 等. 新疆同域分布梭梭和白梭梭多样性格局及其形成机制[J]. 植物生态学报, 2024, 48(1): 56–67. [Chen Yuting, Ma Songmei, Zhang Dan, et al. Diversity pattern and formation mechanism of sympatric *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum* in Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2024, 48(1): 56–67.]

[5] 俞阗, 张君萍, 马洪雨, 等. 梭梭抗逆相关研究进展[J]. 新疆农业科学, 2009, 46(4): 907–912. [Yu Tian, Zhang Junping, Ma Hongyu, et al. Advances of study on the adversity-resistance of *Haloxylon*[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2009, 46(4): 907–912.]

[6] 蔡新斌, 吴俊侠. 甘家湖自然保护区白梭梭种群特征与动态分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(7): 90–94. [Cai Xinbin, Wu Junxia. Characteristics and dynamics analysis of *Haloxylon persicum* populations in the Nature Reserve of Gan Jia Lake[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(7): 90–94.]

[7] 李引滑. 近三十年来新疆甘家湖自然保护区梭梭林退化过程研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2013. [Li Yinmin. Last three decades *Haloxylon* forest degradation process of Ganjiahu Nature Reserve in Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2013.]

[8] Hill M O. TWINSPAN: A fortran program for arranging multivariate data in an ordered two-way table by classification of the individuals and attributes[D]. New York: Cornell University, 1979.

[9] Sarker S K, Nur-Un-Nabi M, Mohasinul H M, et al. Tree assemblages and diversity patterns in tropical Juri forest, Bangladesh[J]. Journal of Forestry Research, 2015, 26(1): 159–169.

[10] Swierkosz K, Reczyńska K, Boublík K. Variability of *Abies alba*-dominated forests in central Europe[J]. Open Life Sciences, 2014, 9(5): 495–518.

[11] Zhu Y J, Shan D, Wang B Z, et al. Floristic features and vegetation classification of the Hulun Buir steppe in north China: Geography and climate-driven steppe diversification[J]. Global Ecology and Conservation, 2019, 20: e00741, doi: 10.1016/j.gecco.2019.e00741.

[12] Nkosi S E, Barrett A S, Brown L R. Vegetation ecology of the Nooitgedacht section of Loskop Dam Nature Reserve, Mpumalanga[J]. South African Journal of Botany, 2016, 105: 79–88.

[13] Sallam H, Alzain M N, Abuzaid A O, et al. Wild plant diversity and soil characteristics of desert roadside vegetation in the eastern desert[J]. Diversity, 2023, 15(7): 874, doi: 10.3390/d15070874.

[14] Zeng Y, Zhao C Y, Shi F Z, et al. Impact of groundwater depth and soil salinity on riparian plant diversity and distribution in an arid area of China[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 7272, doi: 10.1038/s41598-020-64045-w.

[15] Manhas R K, Gautam M K, Kumari D. Two way indicator species analysis (TWINSPAN) of the herbaceous vegetation in an inland wetland ecosystem of Doon Valley Himalaya, India[J]. Journal of Wetlands Ecology, 2009, 3: 23–31.

[16] Rollet R, Benie G B, Li W, et al. Image classification algorithm based on the RBF neural network and *K*-means[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(15): 3003–3009.

[17] 文铜, 柳小妮, 纪童, 等. 基于植被指数的三江源高寒草地植物分类与识别方法研究[J]. 草地学报, 2022, 30(7): 1811–1818. [Wen Tong, Liu Xiaoni, Ji Tong, et al. Studying on plant classification and recognition method for Three-River Source alpine grassland plant based on vegetation index[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(7): 1811–1818.]

[18] Belgiu M, Drăguţ L. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 114: 24–31.

[19] Zhou J H, Lai L M, Guan T Y, et al. Comparison modeling for alpine vegetation distribution in an arid area[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(7): 408, doi: 10.1007/s10661-016-5417-x.

[20] Han F S, Fu G, Yu C Q, et al. Modeling nutrition quality and storage of forage using climate data and normalized-difference vegetation index in alpine grasslands[J]. Remote Sensing, 2022, 14(14): 3410, doi: 10.3390/rs14143410.

[21] Caddy-Retalic S, Wardle G M, Leitch E J, et al. Vegetation change along a Mediterranean to arid zone bioclimatic gradient reveals scale-dependent ecotone patterning[J]. Australian Journal of Botany, 2020, 68(8): 574–586.

[22] 王国宏, 方精云, 郭柯, 等.《中国植被志》研编内容与规范[J]. 植物生态学报, 2020, 44(2): 128–178. [Wang Guohong, Fang Jingyun, Guo Ke, et al. Contents and protocols for the classification and description of Vegetation Formations, Alliances and Associations of "Vegetation of China"[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, 44(2): 128–178.]

[23] 刘丽燕, 蔡新斌, 江晓珩, 等. 甘家湖梭梭林国家级自然保护区

植被类型和特征[J]. 防护林科技, 2016(6): 54-57. [Liu Liyan, Cai Xinbin, Jiang Xiaoheng, et al. Types and characteristics of vegetation in Ganjiahu *Haloxylon ammodendron* Forest National Nature Reserve[J]. Protection Forest Science and Technology, 2016 (6): 54-57.]

[24] 马倩, 楚新正, 孙慧兰, 等. 新疆甘家湖梭梭林绿洲-荒漠过渡带土地利用/覆被动态变化分析[J]. 新疆师范大学学报(自然科学版), 2014, 33(1): 8-13, 37. [Ma Qian, Chu Xinzheng, Sun Huilan, et al. Study on land use/cover dynamic change in Ganjia Lake Ecotone[J]. Journal of Xinjiang Normal University (Natural Sciences Edition), 2014, 33(1): 8-13, 37.]

[25] 王育松, 上官铁梁. 关于重要值计算方法的若干问题[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2010, 33(2): 312-316. [Wang Yusong, Shangguan Tieliang. Discussion on calculating method of important values[J]. Journal of Shanxi University (Natural Sciences Edition), 2010, 33(2): 312-316.]

[26] Zang S, Cao Q, Keremu A, et al. Food patch particularity and forging strategy of reintroduced Przewalski's horse in north Xinjiang, China[J]. Turkish Journal of Zoology, 2017, 41: 924-930.

[27] 李俊晓, 李朝奎, 殷智慧. 基于ArcGIS的克里金插值方法及其应用[J]. 测绘通报, 2013(9): 87-90. [Li Junxiao, Li Chaokui, Yin Zhihui. ArcGIS based Kriging interpolation method and its application[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(9): 87-90.]

[28] 刘丽燕, 蔡新斌, 江晓珩, 等. 新疆甘家湖梭梭林自然保护区植物组成及地理成分分析[J]. 植物科学学报, 2016, 34(5): 695-704. [Liu Liyan, Cai Xinbin, Jiang Xiaoheng, et al. Species composition and floral components of vascular plants in Ganjiahu Nature Reserve of Xinjiang[J]. Plant Science Journal, 2016, 34(5): 695-704.]

[29] 高晓宇, 郝海超, 张雪琪, 等. 中国西北干旱区植被水分利用效率变化对气象要素的响应——以新疆为例[J]. 干旱区地理, 2023, 46(7): 1111-1120. [Gao Xiaoyu, Hao Haichao, Zhang Xueqi, et al. Responses of vegetation water use efficiency to meteorological factors in arid areas of northwest China: A case of Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(7): 1111-1120.]

[30] Puigdefabregas J, Sole A, Gutierrez L, et al. Scales and processes of water and sediment redistribution in drylands: Results from the Rambla Honda field site in southeast Spain[J]. Earth-Science Reviews, 1999, 48(1-2): 39-70.

[31] 徐先英, 严平, 郭树江, 等. 干旱荒漠区绿洲边缘典型固沙灌木的降水截留特征[J]. 中国沙漠, 2013, 33(1): 141-145. [Xu Xianying, Yan Ping, Guo Shujiang, et al. The interception loss of rainfall by three sand-fixing shrubs at the fringe of Minqin Oasis [J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(1): 141-145.]

[32] Li X R, Xiao H L, Zhang J G, et al. Long-term ecosystem effects of sand-binding vegetation in the Tengger Desert, northern China[J]. Restoration Ecology, 2004, 3(12): 376-390.

[33] 李引滑, 曲宁. 甘家湖梭梭林的变化浅析[J]. 和田师范专科学校学报, 2014(5): 77-82. [Li Yinmin, Qu Ning. A brief analysis of the changes in *Haloxylon* forest in Ganjiahu[J]. Journal of Hetian Normal College, 2014(5): 77-82.]

[34] 朱家龙, 周智彬, 王立生, 等. 免灌人工梭梭林生长与土壤水分变化的耦合关系[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1579-1590. [Zhu Jialong, Zhou Zhibin, Wang Lisheng, et al. Coupling relationship between growth and soil moisture change of *Haloxylon ammodendron* plantation without irrigation[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1579-1590.]

[35] 曹家睿. 甘家湖白梭梭空间格局分析[J]. 南方农业, 2020, 14 (27): 186-188, 218. [Cao Jiarui. Analysis of the spatial pattern of *Haloxylon persicum* in Ganjiahu[J]. South China Agriculture, 2020, 14(27): 186-188, 218.]

[36] Abdollahi A, Pradhan B, Alamri A. Regional-scale analysis of vegetation dynamics using satellite data and machine learning algorithms: A multi-factorial approach[J]. International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, 2023, 16(1): 264378840, doi: 10.2478/ijssis-2023-0013.

[37] Tikuye B G, Rusnak M, Manjunatha B R, et al. Land use and land cover change detection using the random forest approach: The case of the upper Blue Nile River Basin, Ethiopia[J]. Global Challenges, 2023, 7(10): 2300155, doi: 10.1002/gch2.202300155.

[38] Francis R J, Kingsford R T, Moseby K, et al. Tracking landscape scale vegetation change in the arid zone by integrating ground, drone and satellite data[J]. Remote Sensing in Ecology and Conservation, 2023, 10(3): 374-387.

[39] Barrett B, Raab C, Cawkwell F, et al. Upland vegetation mapping using random forests with optical and radar satellite data[J]. Remote Sensing in Ecology and Conservation, 2016, 2(4): 212-231.

Vegetation community diversity and spatial distribution pattern in Ganjiahu Saxoul National Nature Reserve, Xinjiang

WANG Anqi[1], ZHANG Yu[1], LIU Jiawei[1], ZHAO Wei[2], LIU Xinyu[2], LI Kai[1]

(1. School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Jinghe Branch of Ganjiahu Saxoul National Nature Reserve Administration, Jinghe 833300, Xinjiang, China)

Abstract: The Ganjiahu Saxoul National Nature Reserve in Xinjiang, China, is situated in a typical oasis-desert transition zone. Clearly identifying the main vegetation types and their distribution within the reserve is essential for biodiversity protection and restoration. Based on remote sensing images from 2022, a field survey was conducted in August 2023. Vegetation samples from the Ganjiahu Saxoul National Nature Reserve were classified using the two-way indicator species analysis (TWINSPAN) method. Alpha diversity indices of each vegetation type were calculated, followed by the development of a random forest model to evaluate and visualize the clustering results of vegetation quadrats. The results are as follows: (1) In the Ganjiahu Saxoul National Nature Reserve, the dominant herbaceous plants are primarily *Salsola* spp., while the principal shrubs include *Haloxylon ammodendron*, *Suaeda* spp., *Reaumuria songarica*, and *Ceratocarpus arenarius*. (2) Sixty-two vegetation sample plots were categorized into 14 types in TWINSPAN. Among these, the Ass. *Salsola* spp.+*Suaeda* spp. (G5) covered the largest area and exhibited the highest vegetation diversity. The Ass. *Salsola* spp. + *Ceratocarpus arenarius* (G7) showed both high species diversity and extensive coverage. The G14 type represented a single vegetation community with the lowest Shannon-Wiener and Simpson's diversity indices and had a Pielou's evenness index of 1, predominantly comprising farmland and highly saline bare land in the Ganjiahu Saxoul National Nature Reserve. (3) The random forest model achieved an overall accuracy of 87.10%, with a Kappa coefficient of 0.8553, and demonstrated relatively low commission and omission errors. (4) *H. ammodendron* and *H. persicum* are mainly distributed in the core area in the northwest and the buffer zone extending from the central to southern parts of the Ganjiahu Saxoul National Nature Reserve. These findings provide a foundation for future precise management of the Ganjiahu Saxoul National Nature Reserve.

Key words: vegetation types; spatial distribution; two-way indicator species analysis method; species diversity; random forest